

# 需要の確率変動を考慮した遅れ時間評価型リアルタイム交通信号制御

東京大学大学院 学生会員 浅野 美帆

(株)アイ・トランスポート・ラボ 正会員 堀口 良太

東京大学国際・産学協同研究センター 正会員 桑原 雅夫

## 1. はじめに

本研究では、ITSによる車両測定技術に基づき遅れ時間を直接測定、評価する信号制御アルゴリズムに車両の到着分布の確率変動を考慮することにより、制御パラメータの安定性向上を図っている。

国内における現行の信号制御方式は、飽和度感応によるパターン選択制御方式が主流となっている。これは感知器等で各流入路の交通量を計測し、求められた飽和度の比に応じて、あらかじめ設定してある現示階梯のパターンの中から適当なものを選択する方式である。この方式には、飽和度に基づく現示の設計方法自体が遅れ時間を最小化するとは限らない、設定した現示階梯以外を表示できないため、パターン設定後の交通状況の経年変化や、工事期間中の車線数減少による交通状況の変化に自動対応できない、といった問題がある。

以上の問題点を解決するため、筆者らは遅れをリアルタイムに直接計測し、それを最小化する信号制御アルゴリズム<sup>1)</sup>(以下、CARREN: Control Algorithm Retuning parameters with self performance Evaluation)を開発しており、交通状況が刻々と変動する状況下での遅れの減少効果もシミュレーション実験により示されている<sup>1)</sup>。これまでのアルゴリズムでは、直前サイクルにおける到着交通量に対して遅れ時間が最小となる信号パラメータを求めて、次サイクルに適用していた。しかしながら、到着のランダム性を考慮していなかったため、求めた制御パラメータが次サイクルで最適である保証がなく、結果的に一時的な過飽和状態を招く可能性があった。本稿ではこの問題点について解説するとともに、より安定な制御に向けた解決案を提案・検証する。

## 2. 信号制御アルゴリズムCARRENの概要

### 2.1 リアルタイム遅れ時間評価アルゴリズム

CARRENでは、個々の車両の旅行時間実測データから信号待ちによる遅れ時間を算出し、ネットワーク全体の遅れ時間を減少させるように制御パラメータ(サイクル長、スプリット、オフセット)を一定量ずつ更新する。遅れ時間の評価には図1に示す交通量累加図を用いており、信号パラメータの微小変化による累加図の形状変化を推定することで遅れの変化量を算出している。

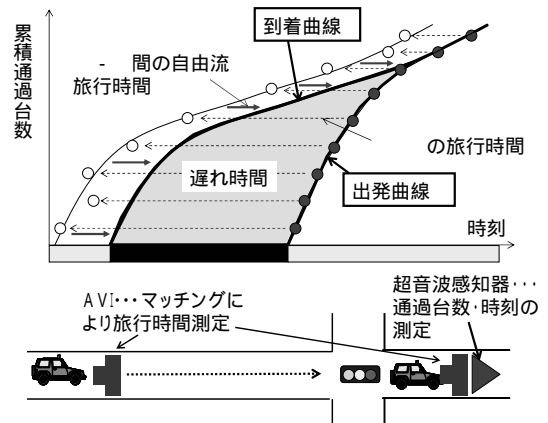


図1 交通量累加図<sup>1)</sup>

### 2.2 需要の確率変動による遅れ

交通量累加図は実測値を元に作成されるため、交差点をすでに通過した車両の過去のデータしか利用できない。一方、求める信号パラメータは将来のサイクルに適用されるため、CARRENでは「最新の累加図を描いた時点とまったく同じ累加図パターンが次のサイクルでも発生する」という仮定をおき、遅れ時間の評価を行っている。

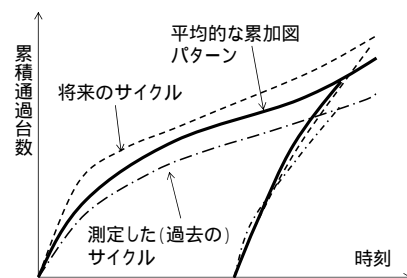


図2 ランダム到着に伴う累加図形状の変化

Keywords: 信号制御, ITS, 遅れ時間, リアルタイム

\*連絡先: asano@iis.u-tokyo.ac.jp

03-5452-6419

ところが、実際には車両の到着分布はランダムであり、累加図の形も毎サイクル変動しうる。図2はこのランダム変動の様子を示したものである。累加図の形は測定値(一点鎖線)と将来(点線)とで異なっており、そのため評価すべき遅れ時間の値そのものも異なってくる。

### 2.3 車両のランダム到着に伴うパラメータ振動

ランダム到着が制御結果に与える影響を見てみよう。もっとも単純なネットワークとして、図3のような孤立交差点を仮定する。交通流シミュレーションモデルAVENUE<sup>3)</sup>を用いて、表1の条件下でCARRENの制御を行った結果を図4、5に示す。なお参考として、この条件でのWebsterの最適サイクル長(77秒)を図4に併記している。

図4のように、CARRENで算出したサイクル長・スプリットは大きく振動してしまう。これはCARRENが交通需要の確

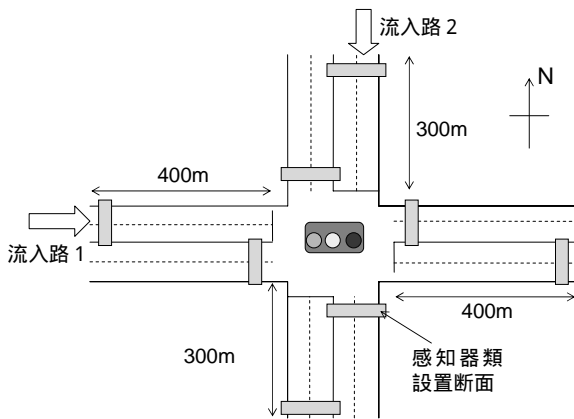


図3 孤立交差点

表1 シミュレーション設定

設定項目	設定値
飽和交通流率	1800 [pcu/G1hr/lane]
自由流速度	36 [km/時]
ロスタイム	12 秒
設定需要	流入路1 : 1440[pcu/h](飽和度 0.4) 流入路2 : 1080[pcu/h](飽和度 0.3) (車両はランダム発生)

サイクル長とスプリット

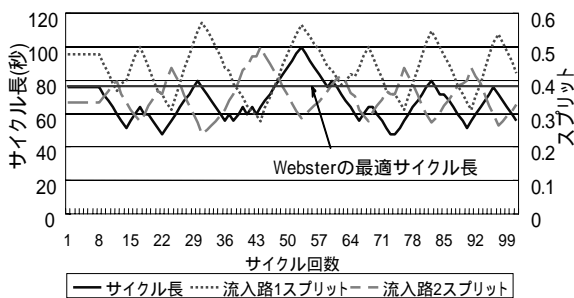


図4 CARREN制御による信号パラメータ推移

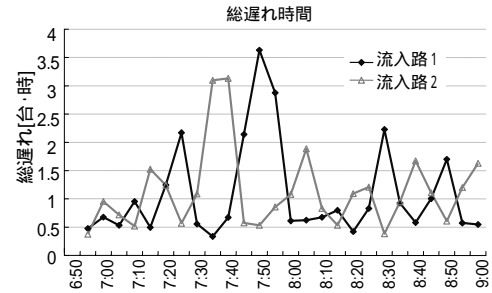


図5 CARREN制御時の遅れ時間推移

率変動を考慮していないためであると考えられる。

CARRENでは、図2で示した累加図パターンの測定値(ここでは一点鎖線)を遅れの評価に利用する。直前サイクルの到着需要が図2のように少ないと、それにあわせて遅れ時間が小さくなるよう、サイクル長を短くする方向にパラメータを調整する。これが数サイクル続いたあとに、ランダム性により点線のような大きな到着需要があると、短くなっているサイクル長では捌ききることができず、一時的な過飽和状態を引き起こしてしまう。これを解消するために、その次以降のサイクルではサイクル長を長くするようにアルゴリズムが動作する。到着需要のランダム性が強いとこの状況が繰り返し発生し、結果サイクル長が振動してしまう。

このような状況を防ぐためには、信号パラメータの決定時に到着分布の確率変動も考慮しなければならない。

なお、系統制御においては上流交差点によって交通流が整流されることから、振動はある程度抑えられている。

### 3. 需要の確率変動を考慮した遅れ時間評価

#### 3.1 需要の確率変動を踏まえた遅れ評価式

ある流入方向のサイクル $i$ における遅れ時間総量 $W$ は、  
 サイクル $i$ の遅れ時間の期待値  
 サイクル $i$ の遅れ時間測定値の期待値からのずれ  
 サイクル $i$ で捌ききれなかった車両が次のサイクルまで滞留することによる遅れ時間

の和で表される<sup>4)</sup>。  $\bar{w}$  はランダム変動を排除した平均的な到着パターン(図2太線)での遅れ時間である。  $w$  は非飽和状態での到着のランダム変動による遅れで、図2の(一点鎖線の遅れ時間 - 太線の遅れ時間)で示される。

$w$  は一時的に捌け残り車両が発生したときの遅れ時間であり、1サイクルで捌けなかった車両は次のサイクルまで滞留することから、(捌け残り車両台数の期待値 × サイクル長)で示される。

これまでのCARRENではランダム到着を考慮していない

ため、すべてのサイクルの遅れが に一致するものとみなして評価していると言える。したがって、遅れの評価に測定した累加図ではなく、平均的な累加図パターンを用いるだけで、現行の評価式<sup>2)</sup>を利用して を求めることができよう。また は や の遅れ時間に比べて非常に小さく、パラメータの決定にはほとんど影響しない<sup>4)</sup>。したがって、以下では の評価方法について検討する。

### 3.2 確率的な捌け残り車両の発生による遅れ時間

Newell<sup>4)</sup>は、交通需要の確率変動により、1サイクルで捌くことのできない車両による遅れ時間の1台あたりの期待値として、以下の式を提案している。

$$E(w_s) = \frac{IH}{2\bar{s}} \left[ \frac{G}{C} - \frac{\bar{q}}{\bar{s}} \right]^{-1} \quad (1)$$

式(1)で、 $C$ ,  $G$ ,  $\bar{q}$ ,  $\bar{s}$  はそれぞれサイクル長、対象方向の有効青時間、到着流率、飽和交通流率の期待値を示す。 $H$ は補正項( $0 < H < 1$ )で、 $I$ の関数である。

$I$ は以下の式で表される。

$$I = \frac{(\text{青現示終了時の待ち行列長の分散})}{(\text{" の期待値})} \\ = \frac{\text{Var}\{qC - sG\}}{E\{qC - sG\}} \quad (2)$$

$q$ ,  $s$ は各サイクルの到着・出発流率を表す。なお、式(1)は、需要の確率的な到着分布に依存しない一般式である。

式(1)を用いて、信号パラメータが変化したときの、の遅れ時間の変化量を考える。CARRENではパラメータ探索数を減らすためにまず現行サイクル長のもとでのスプリット変更量を決定し、その後サイクル長・オフセット変更量を同時決定している。の遅れ評価もこの方法に倣い、まずスプリット変更時の遅れ時間を評価したうえでサイクル長変更時の遅れ変化を取り扱う。

### 3.3 スプリット変化時の確率変動遅れの変化量

サイクル長固定時において、対象とする流入路の青時間が変化した時の1台あたりの遅れの変化量を考える。

$$\frac{\partial E(w_s)}{\partial G} = -\frac{IH}{2\bar{s}C} \left[ \frac{G}{C} - \frac{\bar{q}}{\bar{s}} \right]^{-2} \quad (3)$$

より、スプリットが  $G$  増加した際のサイクル当たり一流入路あたりの遅れ時間変化量  $d_G$  は

$$d_G = \frac{\partial E(w_s)}{\partial G} \Delta_G \cdot \bar{q}C = -\frac{IH\bar{q}}{2\bar{s}} \left[ \frac{G}{C} - \frac{\bar{q}}{\bar{s}} \right]^{-2} \Delta_G \quad (4)$$

### 3.4 サイクル長変化時の確率変動遅れの変化量

サイクル長が  $C$  増加した場合の遅れ変化を考える。

$$\frac{\partial E(w_s)}{\partial C} = \frac{IH}{2sC^2} \left( G - C \frac{\partial G}{\partial C} \right) \left[ \frac{G}{C} - \frac{\bar{q}}{\bar{s}} \right]^{-2} \quad (5)$$

サイクル長変化にともない、各流入方向の青時間長は現在のスプリット比に応じて配分されるものとする。ここでロスタイムを  $L$  とすると、対象流入路のスプリット増分は

$$\frac{\partial G}{\partial C} = \frac{G}{C-L} \quad (6)$$

式(5)、(6)より、一流入路当たり単位時間当たりの遅れ変化  $d_C$  は、以下のとおりとなる。

$$d_C = \frac{\partial E(w_s)}{\partial C} \Delta_C \cdot \bar{q} \\ = \frac{IH\bar{q}G}{2sC^2} \left( 1 - \frac{C}{C-L} \right) \left[ \frac{G}{C} - \frac{\bar{q}}{\bar{s}} \right]^{-2} \Delta_C \quad (7)$$

### 3.5 CARRENにおける遅れ時間評価

以上の式(4)、(7)と の遅れ評価式とを足し合わせることで遅れ時間の評価ができる。例えばサイクル一定の下でスプリットが  $G$  変化した場合、の遅れ時間のサイクルあたり変化量を  $d_{DG}$  とすると、式(4)より と を考慮した1サイクルあたりの遅れの変化量は以下で示される。

$$\frac{\partial W}{\partial G} \Delta_G = d_{DG} + d_G \quad (8)$$

サイクル長が  $C$  変化した時の単位時間あたり遅れ変化量も、式(7)と の遅れの単位時間あたり変化量  $d_{DC}$  を用いて次のように表される。

$$\frac{\partial W}{\partial C} \Delta_C = d_{DC} + d_C \quad (9)$$

ところで、累加図の形状変化はランダム変動のみならず、ピーク・オフピークといった時間帯変動も原因となる。そこで本来  $d_{DG}$ ,  $d_{DC}$  の評価には時間帯変動を考慮し、かつランダム変動を排除した累加図を使うべきである。また  $d_G$ ,  $d_C$  も全時間帯のデータをそのまま使うのではなく、時間帯変動を考慮した上で到着流の分散を求めなければならない。しかし今回は簡単のため、次のような処理を行う。

- ・  $d_{DG}$ ,  $d_{DC}$  の評価にはあえて直前サイクルの累加図そのものを用い、変動を排除しないことで時間帯変動をより早く検知する
- ・  $d_G$ ,  $d_C$  の評価には直近10サイクルの累加図を用い、時間帯変動による分散の拡大を防ぐ

#### 4. 確率変動を考慮した場合のシミュレーション結果

3で示した遅れ時間評価式を用いて、図3、表1の設定条件において再度シミュレーションを行った。このときの信号パラメータと遅れ時間の推移を図6、7に示す。

図6では、図4で生じていた信号パラメータの振動が抑えられている。特にスプリットはほぼ一定の値を保っている。サイクル長は60～80秒の間で振動している。これは、遅れ時間評価において直前サイクルの累加図を使っており、到着交通量のランダム変動を排除していないことがパラメータ決定時に影響し、サイクルが収束しないものと考えられる。

なお図7より、サイクル長が収束しなくても、図8のWebster式パラメータと同等の遅れ時間で制御ができていることがわかる。

CARRENで選択されたサイクル長は現在実務で一般的に用いられているWebsterの最適サイクル長に比べ低い値となる。Webster式では、最適サイクル長の近似値を

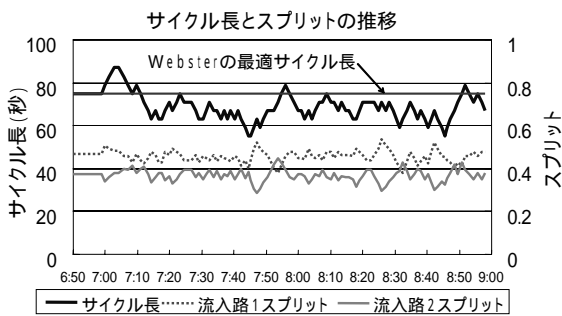


図6 信号パラメータの推移 (確率変動を考慮)

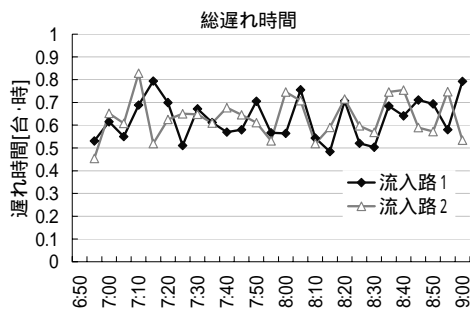


図7 遅れ時間推移 (確率変動を考慮)

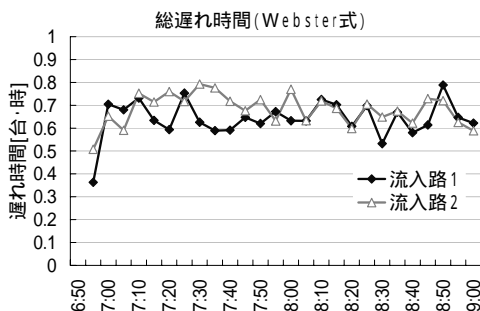


図8 遅れ時間推移 (Webster式の固定パラメータ)

求める際に、交通需要を確実に捌くために安全側の評価を行っているため、サイクル長が大きくなりやすいと考えられる。Webster式の最適サイクル長が本来の最適値よりも大きくなる傾向は、Allsop<sup>5)</sup>の計算機実験によっても示されている。CARRENでは確率変動の考慮により、遅れをより適切に評価できるようになったため、小さいサイクル長での安定した運用が可能になったといえる。

なお紙面の都合上割愛するが、系統制御においてもスプリット・サイクル長が振動しにくくなり、Webster式より小さなサイクル長で安定して運用できるようになっている。

#### 5. おわりに

本稿では、個々の車両の実測遅れ時間を元に信号パラメータを算出するリアルタイム信号制御アルゴリズムに、需要の確率変動を考慮することにより、より安定した制御ができるよう改善を行った。

結果として、スプリット・サイクル長が振動する現象が改善された。また、確率変動を考慮した上でも、現行制御で用いられているサイクル長に比べ小さいサイクル長で運用可能なこと、その際の遅れ時間はほぼ現在の遅れ時間と変わらないことが観察された。

今後の課題としては、今回は累加図評価に3.5のような簡単な仮定をおいていたが、本来であれば時間帯変動とランダム変動とを分けて評価するべきである。時間帯変動の考慮により、さらに安定したパラメータ選択が可能になると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 浅野美帆, 堀口良太, 桑原雅夫: 交通シミュレーションを利用した信号制御アルゴリズム評価のための仮想社会実験, 交通工学 Vol.39, No.2, pp.39-45, 2004.
- 2) 浅野美帆ほか: 遅れ時間自己評価によるリアルタイム交通信号制御, 土木計画学研究・論文集 Vol.20, No.4, pp.879-886, 2003.
- 3) AVENUEホームページ: <http://www.i-transportlab.jp/products/avenue>
- 4) Newell, G.F.: Approximation methods for queues with application to the fixed-cycle traffic light, SIAM Rev. No.2, pp. 223-240, 1965.
- 5) Allsop, R.E.: SIGMET (A computer program for calculating traffic signal settings), Traffic Engineering & Control, 1971.